



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

**“Estimación de la evapotranspiración de cultivo de la cuenca del río Paute
mediante imágenes satelitales”**

**Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero Ambiental**

Autor:

Jhony Javier Tigre Landy

C.I. 1400772156

Email: jhonytigre96@gmail.com

Director:

Ing. Alex Manuel Avilés Añazco. PhD

C.I 0102247186

Cuenca-Ecuador

26 de octubre del 2020

RESUMEN

El objetivo principal de este estudio es determinar la demanda de agua de cultivo o conocida como evapotranspiración cultivo (ET_c) a diferentes escalas mediante el uso de dos índices de vegetación como es el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el índice ajustado al suelo (SAVI) basándose en la teledetección satelital. El estudio se llevó a cabo en la cuenca del río Paute, se utilizaron tres imágenes del satélite Landsat 8 y una de Landsat 7 para determinar el índice de NDVI y SAVI, los cuales se utilizó posteriormente en el cálculo del coeficiente de cultivo (K_{c-VI}). Para determinar la evapotranspiración de referencia (ET_{Cr}) se ocupó la ecuación de Penman- Monteith propuesta por la FAO con datos meteorológicos durante un período de 5 meses. Se aplicó una interpolación spline cúbica para obtener series diarias de índices de vegetación entre dos imágenes satelitales. Con el cálculo de estos dos factores que es el coeficiente de cultivo (K_{c-VI}) y la evapotranspiración de referencia (ET_{Cr}) se estimó la evapotranspiración de cultivo (ET_{Cs}). Los resultados indican que la evapotranspiración de cultivo con el índice SAVI presenta un valor promedio diario más cercano a los obtenidos por otros estudios realizados en la misma área de estudio y en zonas aledañas. Para obtener resultados mejorados se necesita de una mayor serie temporal de imágenes satelitales y de datos meteorológicos, sin embargo, contar con datos in situ de coeficientes de cultivo sería de gran ayuda para realizar una correcta validación de los resultados y determinar un factor de calibración para mejorar las estimaciones de la evapotranspiración a futuro.

PALABRAS CLAVE: Evapotranspiración. Imágenes satelitales. Índices de vegetación. Coeficiente de cultivo.

ABSTRACT

The main objective of this study is to determine the demand for crop water or known as crop evapotranspiration (ET_c) at different scales by using two vegetation indices such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Soil Adjusted Vegetation (SAVI) through remote sensing satellite. The study was carried out conducted in the Paute river basin where three images of the Landsat 8 satellite and one of Landsat 7 was used to determine the NDVI and SAVI index. Therefore, these indices were used to estimate the crop coefficient (K_c - VI). To calculate the reference evapotranspiration (ET_{Cr}), the Penman-Monteith equation proposed by FAO was used with meteorological data for a period of 5 months. A cubic spline interpolation was applied to obtain daily series of vegetation index between pairs of continuous images. With the calculation of these two factors: (i) the crop coefficient (K_c-VI) and (ii) the evapotranspiration reference (ET_{Cr}), the crop evapotranspiration (ET_{Cs}) was estimated. The results indicate that crop evapotranspiration with the SAVI index has a similar mean value at daily scale when compared to other investigations performed in the same study area and surrounding areas. Further improvement of the results will demand a larger series of satellite images and meteorological data. However, direct measurements of ET and site-specific crop coefficients would be of helpful to validate of the results and to determine correction factors in order to improve ET estimates in the future.

KEYWORDS: Evapotranspiration. Satellite images. Vegetation indices. Crop coefficient.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO.....	4
1 INTRODUCCIÓN	9
2 MARCO TEÓRICO	12
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
3.1 Área de estudio	15
3.2 Recolección de datos meteorológicos	16
3.3 Determinación de la evapotranspiración de referencia (ETo).....	18
3.4 Adquisición de imágenes satelitales Landsat.....	19
3.5 Pre-procesamiento de imágenes	20
3.6 Cálculo de índices de vegetación	21
3.7 Cálculo del coeficiente de cultivo	22
4 RESULTADOS	22
4.1 Análisis de la evapotranspiración de referencia (ETo).....	22
4.2 Coeficiente de cultivo (Kc-VI) con NDVI y SAVI	23
4.3 Determinación de la Evapotranspiración de cultivos (ETCs) con los índices de vegetación NDVI y SAVI	24
4.4 Relación de la evapotranspiración de cultivos (ETCs) con la evapotranspiración de referencia (ETo).....	25
4.5 Relación de la ETCs_NDVI, ETCs_SAVI y ETo con la precipitación.....	26
4.6 Relación de la ETCs_NDVI, ETCs_SAVI y ETo con la temperatura media diaria (Tmedia)	27
4.7 Relación de la ETCs_NDVI, ETCs_SAVI y ETo con la Radiación solar diaria (Rso).....	28
5 DISCUSIÓN E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS	29
6 CONCLUSIONES	31
7 RECOMENDACIONES	31
9 ANEXOS.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio	16
Figura 2. Gráfica de los valores promedios diarios por mes de la ETo.	23
Figura 3. Coeficiente de cultivo con el SAVI (VI_SAVI)	24
Figura 4. Coeficiente de cultivo con el NDVI (VI_NDVI)	24
Figura 5. Evapotranspiración de cultivos con SAVI (ETCs_SAVI)	25
Figura 6. Evapotranspiración de cultivos con SAVI (ETCs_SAVI)	25
Figura 7. Comparación de la ETo, ETCs_NDVI y ETCs_SAVI	26
Figura 8. Relación entre la precipitación diaria con la ETo, ETCs_NDVI y la ETCs_SAVI	27
Figura 9. Relación entre la temperatura media diaria con la ETo, ETCs_NDVI y la ETCs_SAVI	28
Figura 10. Relación entre la radiación solar diaria (Rso) con la ETo, ETCs_NDVI y la ETCs_SAVI	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Listado de estaciones meteorológicas y su ubicación	17
Tabla 2. Estaciones pluviométricas con su respectiva altura y coordenadas	18
Tabla 3. Imágenes de Landsat 8	20
Tabla 4. Imagen de Landsat 7	20
Tabla 5. Promedios diarios de los coeficientes de cultivo y su respectiva desviación estándar (sd)	23
Tabla 6. Error medio (ME) de la ETCs_NDVI y ETCs_SAVI con respecto a la ETo ...	26

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Evapotranspiración de referencia (ETo) del período de estudio	41
Anexo 2. Coeficiente de cultivo Kc con NDVI	42
Anexo 3. Coeficiente de cultivo Kc con SAVI	43
Anexo 4. Evapotranspiración de cultivos con el NDVI (ETCs_NDVI)	43
Anexo 5. Evapotranspiración de cultivos con el SAVI (ETCs_SAVI)	44
Anexo 6. Diagrama de flujo para la obtención de la evapotranspiración de cultivos mediante índices de vegetación	45



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Jhony Javier Tigre Landy en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Estimación de la evapotranspiración de cultivo de la cuenca del río Paute mediante imágenes satelitales", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 26 de octubre del 2020

Jhony Javier Tigre Landy

C.I: 1400772156



Cláusula de Propiedad Intelectual

Jhony Javier Tigre Landy autor del trabajo de titulación “Estimación de la evapotranspiración de cultivo de la cuenca del río Paute mediante imágenes satelitales”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 26 de octubre del 2020

Jhony Javier Tigre Landy

C.I: 1400772156



Agradecimiento

Primeramente, quiero agradecer a Dios por haberme bendecido cada día de mi vida universitaria y por darme las fuerzas y sabiduría necesarias para poder culminar este trabajo de investigación.

A mis padres, por ser el pilar fundamental y quienes siempre me estuvieron apoyando en todo momento y nunca desconfiaron de mí.

A mi familia y amigos que me brindaron su apoyo y por todos los consejos que me han aportado a lo largo de esta travesía.

Un agradecimiento de manera muy especial al Ing. Álex Avilés que fue mi guía en este trayecto. Gracias por todo su conocimiento aportado para que este trabajo de investigación se haya desarrollado.

Jhony Javier Tigre Landy

Cuenca, octubre 2020

1 INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración (ET) es un proceso que refleja la combinación de la evaporación de la humedad del suelo, la transpiración de las plantas y también está representado por el flujo del calor latente (Allen, Tasumi, & Trezza, 2007).

La comprensión explícita y cuantitativa de la evapotranspiración (ET) es de suma importancia para la planificación y manejo de los recursos hídricos. La evapotranspiración nos permite entender las interacciones entre el suelo-planta-atmósfera, tener una mayor apreciación entre los flujos de carbono y la biogeoquímica de los nutrientes. (Singh, Liu, Tieszen, Suyker, & Verma, 2012).

Uno de los requisitos fundamentales para estimar la cantidad de agua necesaria para una producción agrícola óptima, es comprender efectivamente las relaciones entre condiciones meteorológicas y la evapotranspiración (Maeda, Wiberg, & Pellikka, 2011). Contar con estimaciones confiables de ET permite identificar variaciones temporales en los requerimientos de riego, mejorar la asignación de recursos hídricos y evaluar el efecto del uso de la tierra y los cambios de gestión en el balance hídrico, en definitiva, la cuantificación de ET es un componente básico para el diseño, operación y administración de sistemas de riego (Gontia & Tiwari, 2010).

La agricultura al ser el principal consumidor de agua dulce, este recurso natural no es utilizado eficientemente por los agricultores debido a que suministran más agua de lo que consume el cultivo. Por lo tanto una mejor estimación de los requisitos de agua de riego es esencial para utilizar el agua de manera eficiente, de tal modo que esté disponible para su uso en el futuro, para ello es indispensable que los agricultores adopten nuevas tecnologías para calcular la demanda de agua de los cultivos con una mayor precisión (Reyes-Gonzáles, 2017)

La Cuenca del río Paute representa un gran aporte a la producción agropecuaria y energética para el Ecuador, siendo así de gran importancia contar con metodologías alternativas para tener una mejor apreciación del balance hidrológico y así poder evaluar la cantidad de recursos hídricos que se utiliza para la producción de energía y de productos agrícolas. Según datos de la FAO, actualmente el 70% de las extracciones de agua dulce se utilizan para la agricultura. En el Ecuador en la región Sierra la

agricultura es la principal actividad económica de su producto interno bruto. En consecuencia, un control cuidadoso del agua utilizada para el riego es un aspecto clave a considerar a fin de garantizar una distribución adecuada de los recursos disponibles entre el uso residencial, industrial y agrícola (Maeda et al., 2011).

Los métodos directos de estimación de la evapotranspiración (ET) como es la relación de Bowen, covarianza de remolinos (eddy covariance) y lisímetros son muy costosos y consumen un mayor tiempo para la aplicación continua a intervalos apropiados en la región, además éstas mediciones puntuales no son aplicables a cuencas más grandes debido a heterogeneidad de la cobertura vegetal, la fluctuación de las condiciones climáticas y la naturaleza dinámica del proceso de transferencia de agua y calor (Taherparvar & Pirmoradian, 2018).

Debido a que los métodos directos de medición de ET es una tarea difícil, el desarrollo de modelos hidrometeorológicos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o), ha dado como resultado contribuciones importantes para el manejo del riego a escala global regional y local (Maeda et al., 2011).

Una gran variedad de modelos de estimación de la ET_o se ha desarrollado durante las últimas décadas, basándose en principios físicos, ecuaciones empíricas o incluso una combinación de enfoques físicos y empíricos. Los modelos empíricos se basan en observaciones, análisis estadísticos y por lo general son apropiados para una región o condición climática específica. Por otro lado, los modelos con base física pretenden simular principios fundamentales como el balance de energía y transferencia de masa (Reyes-González, Kjaersgaard, Trooien, Hay, & Ahiablame, 2018)

Sin embargo, los modelos complejos desarrollados para simular los procesos físicos implicados en la ET suelen tener numerosas variables y requieren de una gran cantidad de datos de entrada, por ejemplo: radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento, temperatura media, son algunas de las variables usualmente necesarias para estimar la ET_o mediante modelos de base física. Además, el montaje y mantenimiento de estaciones meteorológicas capaces de medir estas variables son a menudo insuficientes para adquirir información necesaria y así poder realizar la representación de la variación espacial-temporal de la ET, dando como resultado un manejo inadecuado del recurso hídrico en estas áreas y aumentando los riesgos de escasez y conflictos relacionados con el agua (Wang & Jia, 2013).

En las últimas décadas las estimaciones de ET basadas en metodologías a través de la teledetección, a pesar de las limitaciones que presenta debidas a la frecuencia temporal, la resolución y la calidad (contaminación por nubes) de la imagen, aparecieron como una alternativa prometedora para representar la ET en modo espacio-temporal (Karimi & Bastiaanssen, 2015). Las imágenes satelitales permiten determinar la energía radiante reflejada, en respuesta a características como es la salud de la vegetación, su espesor y el contenido de agua. Además junto a la evapotranspiración de referencia (ET_o) (Glenn, Neale, Hunsaker, & Nagler, 2011), determinaron la ET tanto para áreas agrícolas como en ecosistemas naturales. Un ejemplo de aplicación regional es el estudio de Ramón-Reinozo, Ballari, Cabrera, Crespo, & Carrillo-Rojas (2019), quienes estimaron la ET para la zona del páramo Andino en el sur del Ecuador en base a índices de vegetación (VI). Los VI se obtienen por el cálculo entre la reflectancia de la parte superior de la atmósfera para las bandas de longitud de onda visible (IR) e infrarrojo cercano (NIR), permitiendo aproximar la densidad y el verdor de la planta el cual está relacionado directamente con la transpiración de la planta (Glenn, Nagler, & Huete, 2010a).

Un método directo de estimación de ET con un empleo fácil y un rendimiento aceptable es el coeficiente de cultivo basado en estos índices (Kc-VI). Este enfoque es una modificación del método basado en el coeficiente de cultivo de la FAO-56, donde el coeficiente de cultivo (Kc) se sustituye por un VI. Este método es ampliamente utilizado y aceptado en todo el mundo para el correcto manejo del recurso hídrico en diferentes tierras de cultivo, áreas naturales y en zonas locales a globales (Glenn et al., 2011).

Er-Raki et al. (2010) en su investigación menciona que existe dos tipos de coeficientes de cultivo: el único y el coeficiente doble; el primer coeficiente combina la evaporación de las plantas y del suelo, mientras que el segundo considera estos dos procesos por separado y es más utilizado para zonas áridas y semiáridas en donde se los aplica un factor de estrés (Molina, Vanacker, Brisson, Mora, & Balthazar, 2015).

Para determinar la ET en la cuenca del río Paute se utilizó el coeficiente de cultivo único, el cual la mayor parte del área está cubierta por vegetación y zonas agrícolas, generando una alta evapotranspiración producida por la transpiración y en ciertas zonas producidas por la evaporación del suelo. Por lo tanto, los objetivos del estudio fueron: (1) Estimar la evapotranspiración de referencia a nivel de estación meteorológica a través de métodos convencionales mediante datos de variables meteorológicas (ETCr)

(2) obtener el coeficiente de cultivo K_c mediante índices como el NDVI y SAVI, (3) Análisis comparativo de los valores de K_c obtenidos por el NDVI y SAVI, (4) estimar la evapotranspiración de los cultivos a nivel espacial a través de las imágenes satelitales (ETCs), (5) realizar un análisis comparativo de la evapotranspiración obtenida con el NDVI y SAVI y (6) analizar la relación entre ETCs y ET_{Cr} .

2 MARCO TEÓRICO

Dos categorías principales de la evapotranspiración (ET) son: la evapotranspiración de referencia (ET_o) y la evapotranspiración de cultivo (ETC), que reflejan la demanda de agua de los cultivos y el consumo real de agua. La ET_o corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas, sin restricciones de agua y se lo utiliza para el estudio de la demanda de la evapotranspiración de la atmósfera independiente del tipo y desarrollo del cultivo y de las prácticas de manejo que se lo realice. Por otra parte, la ET_c representa la pérdida de agua en un ambiente natural, donde puede existir condiciones no óptimas como es la presencia de enfermedades, plagas, salinidad del suelo, limitación o exceso de agua y baja fertilidad del suelo (Liaqat & Choi, 2017).

La relación de ETC – ET_o se puede usar generalmente para definir las áreas bajo condiciones de escasez de agua o que presentan abundante agua, ambas formas de evapotranspiración son igualmente importantes para varias aplicaciones hidrológicas como la programación del agua en los esquemas de riego, el análisis de investigación del cambio climático, evaluación de balances hídricos y para simular modelos de producción desde el campo hasta la cuenca hidrográfica (Singh, 2009).

En los últimos años, los usos de sensores remotos se han convertido en una herramienta básica para estimar el uso del agua por los cultivos en la agricultura. También con la ayuda de imágenes multiespectrales obtenidos de sensores remotos montados en satélites se pueden estimar índices de vegetación. El índice de vegetación como es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), han sido utilizados para monitorear la vegetación, predecir los rendimientos y estimar el consumo de agua en los cultivos.

El NDVI capta el contraste de la reflectancia de la luz a partir de las hojas verdes entre las longitudes de onda del rojo (R) y el infrarrojo cercano (NIR). La luz roja está

fuertemente absorbida por la clorofila de las hojas de las capas superiores del follaje, mientras que el infrarrojo cercano es transmitido, reflejado y dispersado por la estructura del mesófilo de la hoja, penetrando hasta el fondo del follaje e interactuando con múltiples capas de las hojas, mientras que el SAVI se utiliza para corregir al NDVI para la influencia del brillo del suelo en áreas donde la cubierta vegetal es baja (Reyes González et al., 2019).

Según (Park, Baik, & Choi, 2017) el enfoque más común para estimar la $ETCr$ basándose en imágenes satelitales, es multiplicar el coeficiente de cultivo (Kc) por la ETo , en donde ETo se calcula utilizando la ecuación de Penman Monteith como lo sugiere el documento de irrigación y Drenaje No 56 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

$$ETCr = ETo \times Kc \quad \text{Ecuación 1}$$

Se han realizado numerosos estudios para estimar la ETc basada en la teledetección, muchos de estas investigaciones utilizan el método de balance de energía en el que se necesita estimar la temperatura de la superficie y los datos de radiación (Allen et al., 2007). Otro método llamado ($Kc-VI$) se basa en la estimación de la ETo y el Kc , el cuál es obtenido mediante índices de vegetación (VI) la ventaja de este método es que requiere menos datos basados en principios físicos (Liaqat & Choi, 2017).

Para este estudio se utilizó el método del coeficiente de cultivo basado en el índice de vegetación ($Kc-VI$) y para el cálculo de la ETo se aplicó la fórmula de Penman Monteith la cual es recomendada por la FAO. Los coeficientes de cultivo Kc son usualmente obtenidos mediante lisímetros y covarianza de remolinos (eddy covariance) en zonas representativas ya sea naturales o cultivadas. Sin embargo éstas técnicas implican un mayor uso del tiempo y recursos económicos, es por ello que los cálculos de los coeficientes de cultivo mediante el uso de imágenes satelitales fueron desarrollados (Ramón-Reinozo et al., 2019).

Los índices de vegetación reflejan el estado de la vegetación en el momento de la medición, evitando sesgos, es por esto que es adecuado remplazar el Kc de la forma ordinaria por el $Kc-VI$ obtenido mediante imágenes satelitales (Glenn et al., 2011).

El método de $Kc-VI$ consiste en el remplazo del coeficiente de cultivo único Kc de la FAO-56, con un índice normalizado VI cuyo valor oscila entre 0 a 1 (Ecuación 2) que es

obtenido a través de imágenes satelitales. Este remplazo se basa en la validación de (Glenn, Nagler, & Huete, 2010b) quienes demuestran que el VI podría aumentar la precisión de los coeficientes de cultivos ya que proporciona una medición real de la cubierta de cultivos durante el desarrollo, además indican que el Kc y el VI están afectados por el índice del área foliar y la fracción de cobertura vegetal. Entonces la evapotranspiración de cultivos mediante índices de vegetación se obtiene de la siguiente ecuación.

$$ETCs = VI \times ET_o \quad \text{Ecuación 2}$$

La teledetección ha sido empleada como una alternativa para el cálculo de Kc debido a varias ventajas, incluyendo la reflexión de las condiciones ambientales reales y la capacidad de obtener el Kc en tiempo real y de manera espacial. Varios índices de vegetación derivados de datos satelitales, incluyendo el índice de área foliar (IAF), NDVI y el SAVI se han utilizado para determinar el coeficiente de cultivo Kc y mostraron altas correlaciones con valores de Kc tomados in situ (Taherparvar & Pirmoradian, 2018).

Se han desarrollado algunos métodos Kc-VI para cultivos como el trigo (Gontia & Tiwari, 2010), el arroz (Reyes González et al., 2019), zonas de páramo Andino en el sur del Ecuador (Carrillo-Rojas, Silva, Córdova, Céleri, & Bendix, 2016), cultivos de papa (Jayanthi, Neale, & Wright, 2007), en zonas agrícolas y ecosistemas naturales (Glenn et al., 2011), en zonas áridas y semiáridas (Er-Raki, Chehbouni, & Duchemin, 2010). El estudio realizado por (Gontia & Tiwari, 2010) donde se aplicó la tecnología de los sensores remotos para estimar el coeficiente de cultivo del trigo para cada mes mediante dos índices de vegetación como es el NDVI y SAVI, utilizaron una regresión lineal para obtener el coeficiente de cultivo de cada mes y los resultados fueron muy similares a los realizados mediante métodos convencionales.

Según (Courault, Seguin, & Olioso, 2005) el método de balance de energía para determinar la evapotranspiración (ET), presenta un factor de incertidumbre de 10-30%, el cual está dentro del rango de error de los métodos que determinan la ET en el sitio por los cuales se validan. Por lo contrario, los métodos estimación de la ET por índices de vegetación son indirectos y dependen de una estimación de la vegetación y la densidad de la vegetación verde sobre el terreno, que son medidas por la combinación de la banda roja (R) y del infrarrojo cercano (NIR) (Glenn, Huete, Nagler, Hirschboeck, & Brown, 2007).

En ecosistemas naturales los métodos VI son más útiles como una herramienta de monitoreo pasivo, para el uso del agua del ecosistema como una herramienta activa y de rápida respuesta para mitigar la humedad inicial o el estrés hídrico (P. L. Nagler, Morino, Murray, Osterberg, & Glenn, 2009).

Variaciones de la Ecuación 2 han sido aplicados en diferentes estudios para determinar distintos coeficientes de cultivos (K_c), dando resultados similares con los valores obtenidos de lisímetros (Glenn et al., 2010b). Mediante la utilización de imágenes aéreas digitales de alta resolución o imágenes satelitales se han desarrollado coeficientes de cultivo basados en NDVI para el algodón (Hunsaker, Barnes, Clarke, Fitzgerald, & Pinter, 2005), trigo (Er-Raki et al., 2010), cultivo de papas (Jayanthi et al., 2007), maíz (Reyes González et al., 2019), brocoli (El-Shikha, Waller, Hunsaker, Clarke, & Barnes, 2007) y otros cultivos (Gonzalez-Dugo et al., n.d.; Papadavid, Agapiou, Michaelides, & Hadjimitsis, 2009).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

La cuenca del río Paute (Figura 1) se encuentra ubicada entre la cordillera oriental y occidental de los Andes en el Ecuador y comprende un área de 6.481 Km^2 . Presenta un rango de elevación que varía de 442 a 4.415 m.s.n.m y aproximadamente el 40% de la superficie de la cuenca está cubierta por páramo. Varias centrales hidroeléctricas como son: Amaluza (1075MW), Mazar (162.6 MW), Sopladora (500 MW), El Labrado y Chanlud (38.4MW) son alimentadas por varios ríos de la cuenca del río Paute produciendo el mayor porcentaje de energía hidroeléctrica para el Ecuador. Además, la mayoría de las ciudades de la región son beneficiadas directamente por los distintos servicios ecohidrológicos de la cuenca.

El monitoreo de la cuenca del río Paute es constante debido a su gran importancia en la producción de energía hidroeléctrica. Instituciones públicas locales y a nivel nacional como es el instituto nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), Corporación Eléctrica del Ecuador Hidropaute (CELEC EP) y la Empresa de Telecomunicaciones Agua Potable y Alcantarillado de la ciudad de Cuenca (ETAPA EP) cuentan con redes de monitoreo de distintas variables meteorológicas, sin embargo, todas estas redes

están dispersas de manera diversa por el territorio de la cuenca (Contreras, Ballari, & Samaniego, 2017)

La precipitación en la cuenca del río Paute es muy variante dependiendo de la ubicación geográfica, por ejemplo, al sur se presenta un mínimo de lluvias anuales con 600 mm y en la región oriental se da el máximo de precipitaciones anuales con 3000 mm. Es de suma importancia recalcar que la cuenca del Paute cuenta con dos regímenes de precipitación, un unimodal que se encuentra en la zona oriental bajo los 2200 m.s.n.m, con picos de lluvias en los meses de junio o julio; y el segundo es el bimodal para zonas que se encuentran sobre los 2200 m.s.n.m en donde los meses de altas precipitaciones son en noviembre, diciembre, marzo y abril (Deleg, 2018).

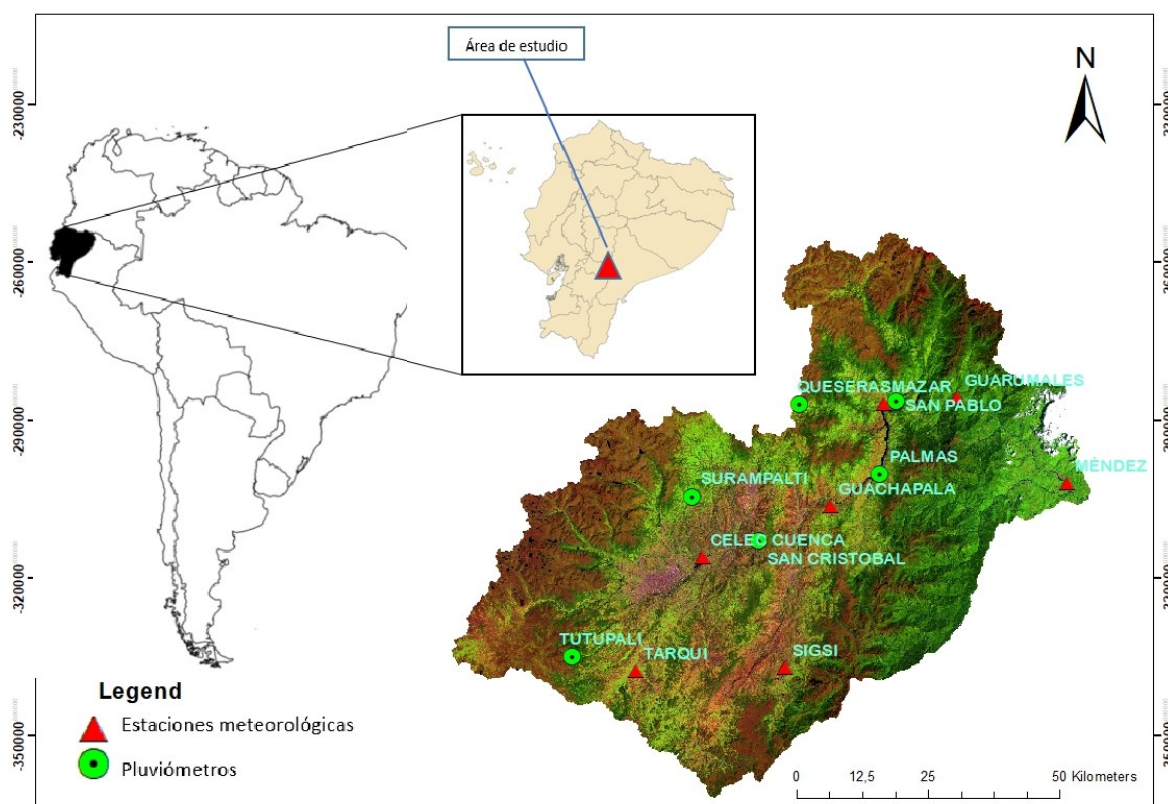


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Fuente: Tigre, J (2019)

3.2 Recolección de datos meteorológicos

Para el estudio se eligió un período de aproximadamente 5 meses (13 de julio de 2015 al 2 de noviembre de 2015), de acuerdo a la disponibilidad de datos meteorológicos

terrestres e imágenes satelitales. La información hidrometeorológica fue proporcionada por la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC Hidropaute), de las cuales se seleccionaron 7 estaciones (Figura 1) que generan datos diarios de Temperatura máxima (Tmax), Temperatura mínima (Tmin), Humedad relativa máxima (HRmax), Humedad relativa mínima (HRmin), Humedad relativa media (HRmedia), Velocidad del viento y precipitación para el cálculo de la evapotranspiración de referencia y su respectivo análisis. La tabla 1 indica el listado de las estaciones con sus respectivas coordenadas y altura.

Tabla 1. Listado de estaciones meteorológicas y su ubicación

ESTACIÓN	Coord (Y)		Altura(msnm)
	Coord (X)		
CELEC CUENCA	729892	9684082	2047
GUARUMALES	778229	9714419	1702
MAZAR	764357	9713257	2020
TARQUI	717092	9662396	2629
SIGSIG	745529	9662895	2597
GUACHAPALA	754204	9693773	2298
MÉNDEZ	799312	9698150	565

Para determinar la precipitación se usó los datos de las 7 estaciones meteorológicas mencionadas anteriormente y adicionalmente se utilizaron los valores de precipitación de 6 pluviómetros (Figura 1) dentro de la cuenca del río Paute provenientes de CELEC EP. La tabla 2 muestra las coordenadas y la altura de las estaciones pluviométricas.

Tabla 2. Estaciones pluviométricas con su respectiva altura y coordenadas

ESTACIÓN	Coord (X)	Coord (Y)	Altura(msnm)
TUTUPALI	705090	9665080	3203
PLUVIO QUESERAS	748262	9713142	3276
PLUVIO SAN PABLO	766747	9713799	2231
PLUVIO SURAMPALTI	727759	9695621	2870
PLUVIO PALMAS	763608	9699898	2316
PLUVIO SAN CRISTOBAL	740515	9687223	2796

3.3 Determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_o)

El método de la FAO Penman-Monteith es el único método estándar recomendado para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia utilizando datos meteorológicos como la radiación, la temperatura del aire, la humedad del aire y la velocidad del viento (Gontia & Tiwari, 2010). A continuación, se describe la ecuación de la FAO Penman-Monteith.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \frac{\gamma (900)}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde

ET_o Evapotranspiración de referencia (mm/día)

R_n Radiación neta sobre la superficie del cultivo ($MJ/m^2 \text{ día}$)

G Flujo calórico utilizado con el calentamiento del suelo ($MJ/m^2 \text{ día}$)

T Temperatura del aire (°C)

e_s Tensión de vapor saturado (KPa)

e_a Tensión de vapor actual (KPa)

$e_s - e_a$ Déficit de presión de vapor de saturación (KPa)

Δ Pendiente de la curva de la tensión de vapor saturado



- γ Constante psicométrica (KPa/ °C)
 u_2 Velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

Esta ecuación nos permite determinar la evapotranspiración de la superficie de referencia (pasto) y proporciona datos con los cuales se puede comparar la evapotranspiración de referencia (ET_o) en diferentes periodos del año o en otras regiones y con la cual se puede relacionar con evapotranspiración de otros cultivos.

La tabulación de datos y el cálculo respectivo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) se lo realizó en Microsoft Excel 2016.

Las estaciones meteorológicas de Tarqui, Sigüig, Guachapala y Méndez no contaban con datos de humedad relativa máxima (HR_{max}) y Humedad relativa mínima (HR_{min}), por lo tanto, se utilizó la humedad relativa media (HR_{media}) que recomienda las Guías de la FAO en caso de no contar con estas variables.

Una vez calculado los valores diarios de ET_o con la aplicación de la fórmula de Penman Monteith, se promediaron estos valores correspondientes a cada mes para así poder obtener la evapotranspiración de referencia diaria por mes, entonces se creó una tabla en Microsoft Excel 2016 que contenía el valor promedio diario de cada mes con su estación y sus respectivas coordenadas y con la ayuda del Software ArcGis 10.5 se aplicó una interpolación con el método de Distancia Inversa Ponderada (IDW) sobre la cuenca del río Paute. De esta manera la información puntual de las estaciones meteorológicas se transformó en mapas distribuidos espacialmente (Ramón-Reinozo et al., 2019) ver Anexo 1.

3.4 Adquisición de imágenes satelitales Landsat

Las imágenes satelitales que se utilizaron en esta investigación fueron Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI, las cuales fueron descargadas de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Las imágenes de Landsat 7 ETM+ tienen una resolución temporal de 16 días y una resolución espacial de 30 m en las bandas ópticas (1,2,3,4,5 y 7) (Singh Rawat, Kumar Singh, Bala, & Szabó, 2019), mientras que las imágenes de Landsat 8 OLI está formada por 8 bandas multiespectrales cuya resolución es de 30 metros para las bandas (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 9) y presenta una nueva banda que se utiliza para investigaciones con

aerosoles (Barker, Heeren, Neale, & Rudnick, 2018).

Debido a las frecuentes condiciones nubladas que se presentan en esta región, la disponibilidad de imágenes era escasa, por lo tanto, se seleccionaron tres imágenes del satélite Landsat 8 OLI (Tabla 3) y una imagen con Landsat 7 ETM+ (Tabla 4).

Tabla 3. Imágenes de Landsat 8

Landsat 8 OLI- Scene ID	Fecha	Path/Row	Porcentaje de nubosidad (%)
LC80100622015194LGN01	13/07/2015	10/62	11.85
LC80100622015258LGN01	15/09/2015	10/62	30.22
LC80100622015306LGN01	02/11/2015	10/62	42.96

Tabla 4. Imagen de Landsat 7

Landsat 7 ETM + Scene ID	Fecha	Path/Row	Porcentaje de nubosidad (%)
LE70100622015234EDC00	22/08/2015	10/62	33

3.5 Pre-procesamiento de imágenes

El Scan Line Corrector (SCL) del satélite Landsat 7 produce un error de bandeo en las imágenes, por lo tanto primeramente se rellenaron los pixeles con el algoritmo *gapfill* que se encuentra en software ArcGis 10.5

Tanto para las imágenes de Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI los datos digitales fueron transformados a valores de radiancia espectral, después de realizar la respectiva corrección radiométrica. Esto se realizó utilizando los factores de escala de radiancia espectral L_{mín} y Max para cada banda, después esta radiancia espectral se convirtió en reflectancia de la parte superior de la atmósfera (TOA) (Chander, Markham, & Helder, 2009). Valores como el ángulo cenital solar, el día juliano, la distancia tierra-sol son necesarios para calcular la reflectancia TOA (Hantson et al., 2011). Todo este

procedimiento se realizó en el Software QGIS3 mediante una herramienta llamada Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), seguidamente se recortaron las imágenes con el contorno de la cuenca del río Paute.

Para eliminar la contaminación de las imágenes producidas por las nubes se realizó un Mosaico con imágenes del mismo satélite que presentaban una menor nubosidad y se encontraban cercanas entre sí. Para este proceso se utilizó el Software ArcGis 10.5.

3.6 Cálculo de índices de vegetación

Par este estudio se utilizó dos índices de vegetación como es el NDVI y el SAVI (Gontia & Tiwari, 2010).

Estos índices calcularon para cada una de las cuatro imágenes satelitales realizadas la corrección TOA, a partir de las siguientes ecuaciones.

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$SAVI = \frac{NIR-R}{NIR+R+L} (1 + L) \quad \text{Ecuación 5}$$

Las bandas *NIR* son el infrarrojo cercano, *R* hace referencia a la banda roja y *L* es un factor de calibración que para este estudio se utilizó un valor de 0.5 que representa a una zona de vegetación intermedia

Este procedimiento se lo realizó en el Software ArcGis 10.5 mediante comando *raster calculator*, después con el comando *Clip* se recortaron las imágenes con respecto al área de la cuenca del río Paute.

Debido a que los índices de vegetación son obtenidos solo para el día en las cuales fueron descargadas las imágenes satelitales y en esta investigación se requiere de valores diarios de NDVI y SAVI para el período de estudio utilizado, es por eso que se implementó una interpolación spline cúbica sugerida por (Singh et al., 2012). Esta interpolación es una curva continua que pasa a través de cada valor de los índices de vegetación en las fechas continuas de saturación de satélites disponibles, generando diariamente índices de vegetación (Er-Raki et al., 2010). Este proceso se realizó con la

ayuda del Software R studio, debido a la poca capacidad de memoria computacional se trabajó las imágenes satelitales con un tamaño de pixel de 100 x 100 m.

3.7 Cálculo del coeficiente de cultivo

Con los datos diarios obtenidos del NDVI y SAVI se calculó el VI con la siguiente ecuación.

$$VI = 1 - (VI_{max} - VI) / (VI_{max} - VI_{min}) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde VI max y VI min representan los valores máximos y mínimos para cada escena individual, siendo VI max el valor donde se da una mayor evapotranspiración (ET) y VI min donde existe suelo desnudo (Glenn et al., 2011), ver Anexos 2 y 3.

Entonces finalmente con la aplicación de la (Ecuación 2) los valores diarios de VI fueron multiplicados con los valores diarios de ETo para obtener la ETCs diaria tanto con el índice NDVI y SAVI, ver Anexos 4 y 5.

En el Anexo 6 se presenta un diagrama del proceso utilizado para obtener el coeficiente de cultivo (VI) en la cuenca del río Paute.

4 RESULTADOS

4.1 Análisis de la evapotranspiración de referencia (ETo)

En la figura 2 se muestran los valores de promedios de la ETo diaria de la cuenca del río Paute obtenida con la ecuación de Penman Monteith, con un valor máximo de 3.92 mm día⁻¹ en el mes de noviembre, un valor medio de 3.55 mm día⁻¹ en el mes de septiembre y en el mes de agosto se presenta un valor mínimo con 2.55 mm día⁻¹.

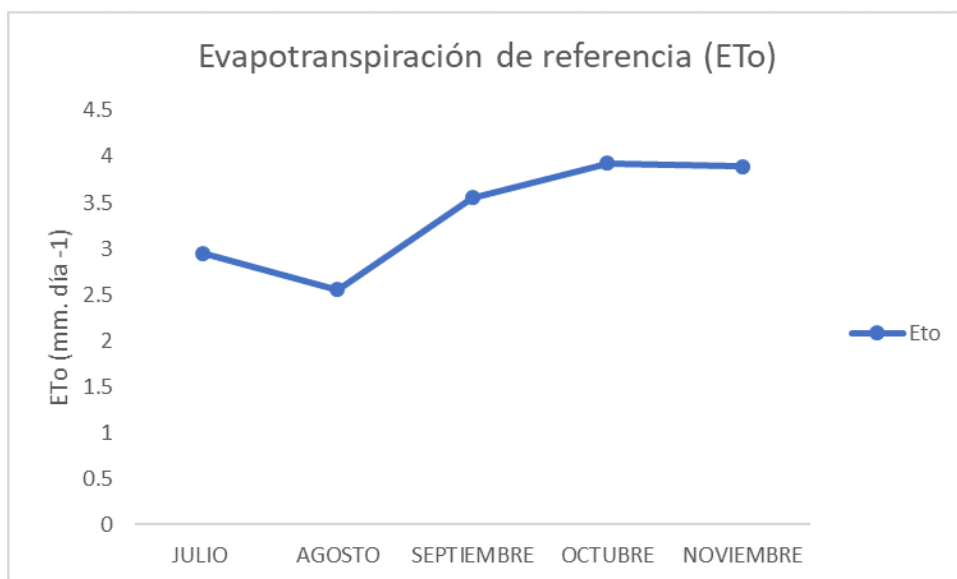


Figura 2. Gráfica de los valores promedios diarios por mes de la ETo.

4.2 Coeficiente de cultivo (Kc-VI) con NDVI y SAVI

La tabla 5 indica los valores promedios diarios de los coeficientes de cultivo (Kc-VI) calculados con los índices de vegetación NDVI y SAVI. Para el NDVI el valor más alto del coeficiente de cultivo (Kc-VI) fue en el mes de noviembre con 0.84 y el menor se presentó en el mes de agosto con 0.71. Para los coeficientes obtenidos con SAVI en el mes de agosto el coeficiente de cultivo fue mayor con 0.59 y en el mes de noviembre se presentó un valor bajo con 0.531 (Figura 3 y 4).

Tabla 5. Promedios diarios de los coeficientes de cultivo y su respectiva desviación estándar (sd)

Mes	VI-NDVI	VI-SAVI
Julio	0.77 (0.09)	0.55 (0.12)
Agosto	0.71 (0.14)	0.59 (0.10)
Septiembre	0.83 (0.09)	0.58 (0.12)
Octubre	0.80 (0.08)	0.53 (0.11)
Noviembre	0.84 (0.09)	0.53 (0.13)

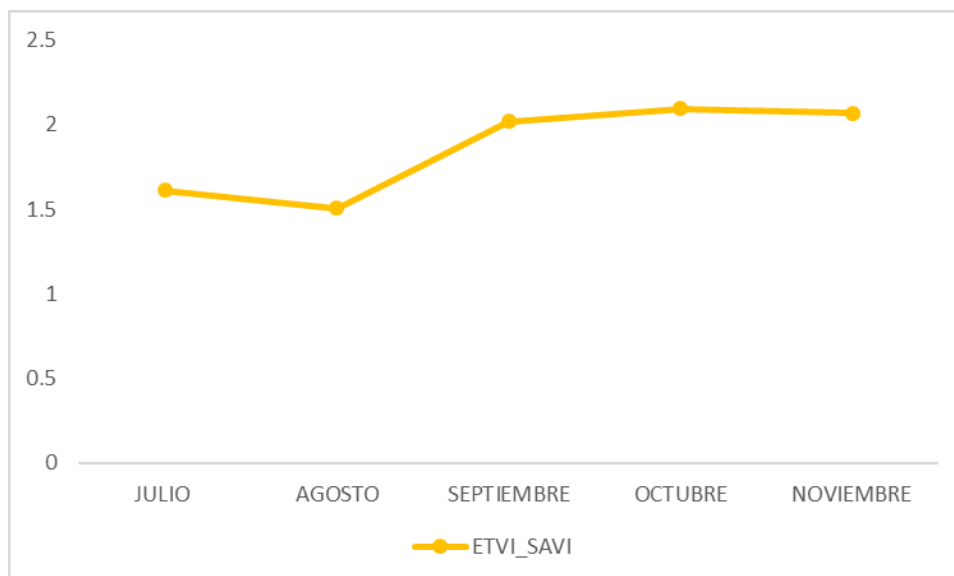


Figura 3. Coeficiente de cultivo con el SAVI (VI_SAVI)

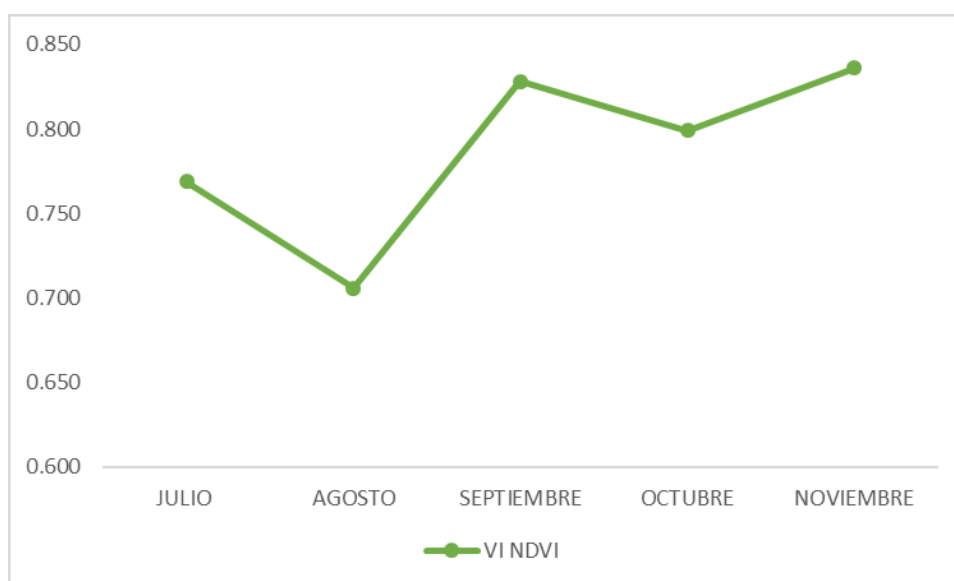


Figura 4. Coeficiente de cultivo con el NDVI (VI_NDVI)

4.3 Determinación de la Evapotranspiración de cultivos (ETCs) con los índices de vegetación NDVI y SAVI

Los valores diarios de ETCs obtenidos con el índice de vegetación NDVI varían entre 1.81 mm día^{-1} a 3.25 mm día^{-1} , el primer dato pertenece al mes de agosto y el segundo al mes de noviembre (Figura 5). Por otra parte, la evapotranspiración de cultivos con el índice de vegetación SAVI, fluctúan de 1.51 mm día^{-1} que es el valor más bajo presente en el mes de agosto, a 2.07 mm día^{-1} para el mes de noviembre siendo este el dato más alto. (Figura 6).

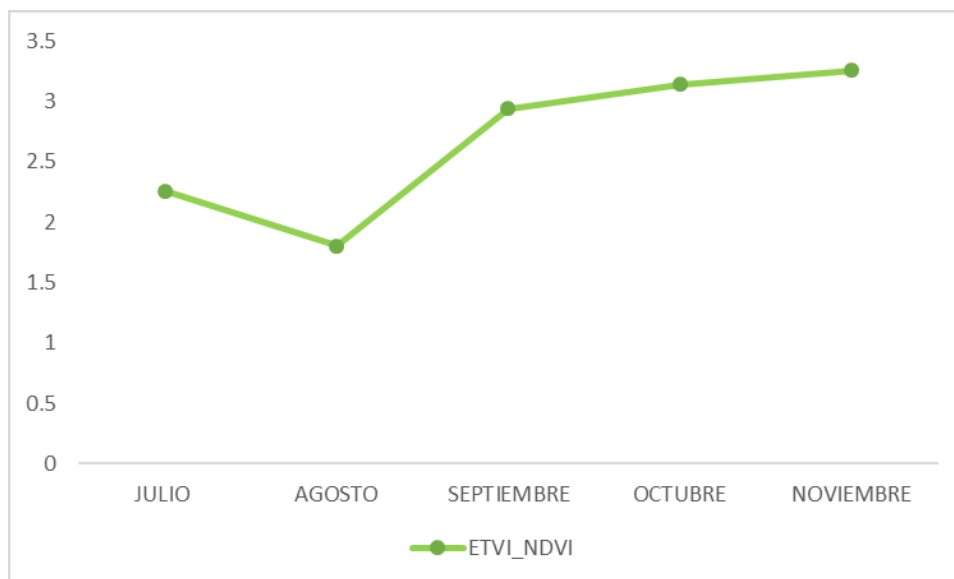


Figura 5. Evapotranspiración de cultivos con SAVI (ETCs_SAVI)

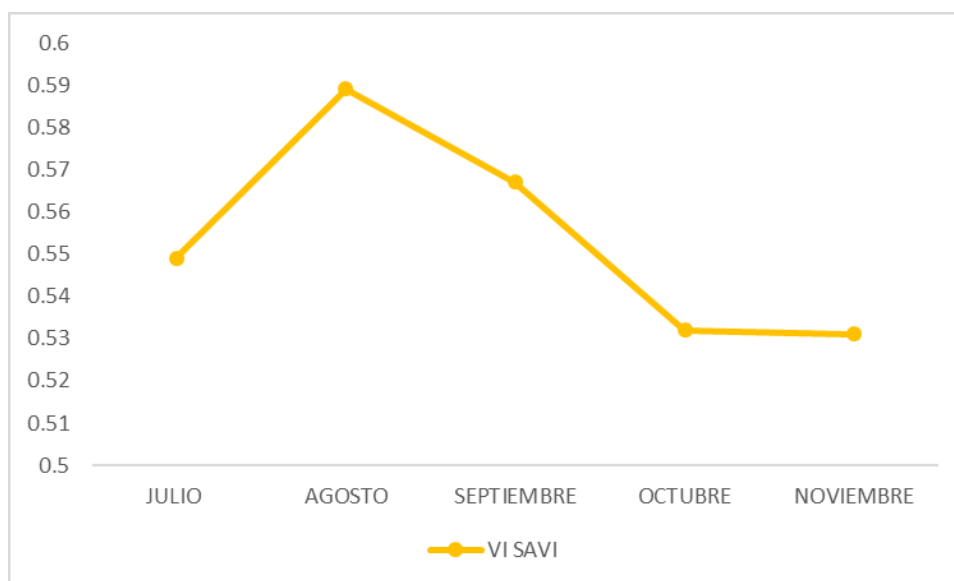


Figura 6. Evapotranspiración de cultivos con SAVI (ETCs_SAVI)

4.4 Relación de la evapotranspiración de cultivos (ETCs) con la evapotranspiración de referencia (ET_o)

La tabla 6 indica el error medio (ME) del ETCs-NDVI y ETCs-SAVI con respecto a la evapotranspiración de referencia (ET_o), generando valores menores de ME con la ET-VI-NDVI, por ejemplo, en el mes de septiembre es igual a $-0.61 \text{ mm día}^{-1}$ y el valor más alto se da en el mes de octubre con un ME de $-0.78 \text{ mm día}^{-1}$. Por otra parte con la ETCs-SAVI el ME menor ocurre en el mes de agosto con valor igual a $-1.04 \text{ mm día}^{-1}$ y para el mes de octubre el ME aumenta a $-1.89 \text{ mm día}^{-1}$.

Tabla 6. Error medio (ME) de la ETCs_NDVI y ETCs_SAVI con respecto a la ETo

Mes	ETo (mm día ⁻¹)	ETCs_NDVI (mm día ⁻¹)	ME	ETCs_SAVI (mm día ⁻¹)	ME
Julio	2.95	2.26	-0.69	1.61	-1.34
Agosto	2.55	1.81	-0.74	1.51	-1.04
Septiembre	3.55	2.94	-0.61	2.02	-1.53
Octubre	3.92	3.14	-0.78	2.03	-1.89
Noviembre	3.89	3.25	-0.64	2.07	-1.82

En la figura 7 se puede apreciar la comparación entre la ETo, ETCs_NDVI y la ETCs_SAVI para los meses de julio a diciembre del año 2015 pertenecientes a la cuenca del río Paute. Cabe recalcar que la ETo fue calculada con datos de estaciones meteorológicas mediante la ecuación de Penman Monteith y los valores de ETCs se obtuvieron mediante la derivación de coeficientes de cultivo obtenidos con índices de vegetación. Se observa que los valores de ETo son más altos que los resultados diarios de ETCs_NDVI y ETCs_SAVI en todo el periodo de estudio. La ETo presenta un promedio diario de 3.37 mm día⁻¹ para el periodo utilizado en esta investigación, mientras que la ETCs_NDVI tiene un valor de 2.68 mm día⁻¹ y el ETCs_SAVI con 1.86 mm día⁻¹.

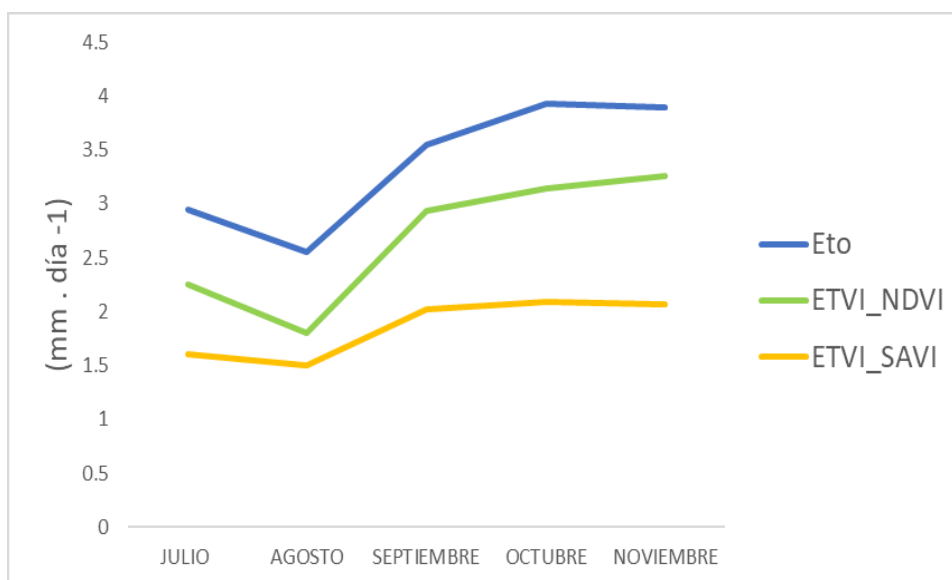


Figura 7. Comparación de la ETo, ETCs_NDVI y ETCs_SAVI

4.5 Relación de la ETCs_NDVI, ETCs_SAVI y ETo con la precipitación

La relación entre la precipitación, ETo, ETCs_NDVI y ETCs_SAVI se indica en la Figura 8 donde los valores más altos de lluvia se dio en el mes de julio con 8 mm día⁻¹ y en el

mes de septiembre fue el de menor precipitación con 2.17 mm día^{-1} .

Se realizó la correlación de la precipitación con los valores de la evapotranspiración de referencia (ETo), la evapotranspiración de cultivos con el NDVI (ETCs_NDVI) y la evapotranspiración de cultivos con el SAVI (ETCs_SAVI), indicando una correlación inversa ($r = -0.58$; $r = -0.61$; $r = -0.72$, respectivamente).

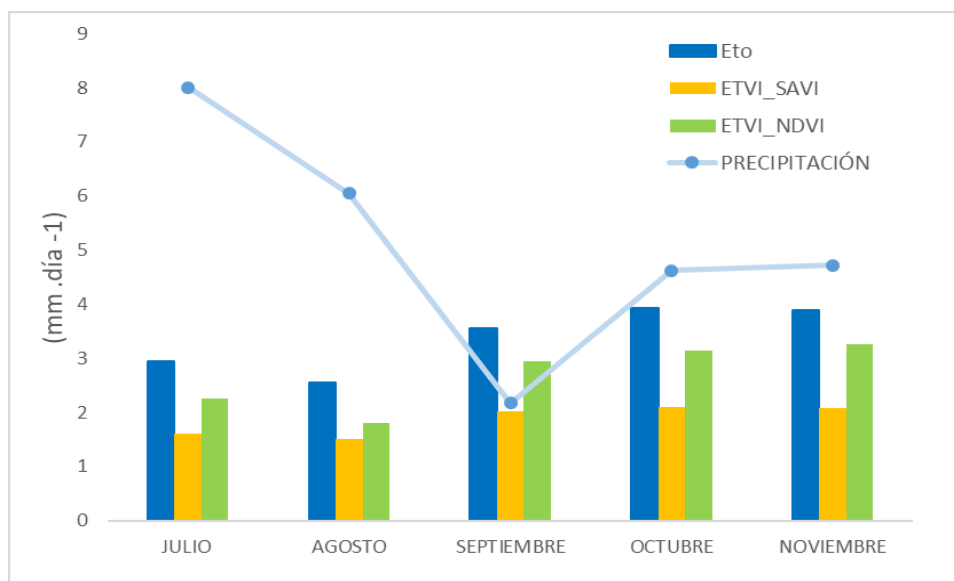


Figura 8. Relación entre la precipitación diaria con la ETo, ETCs_NDVI y la ETCs_SAVI

4.6 Relación de la ETCs_NDVI, ETCs_SAVI y ETo con la temperatura media diaria (Tmedia)

La relación entre la T media diaria (Tmedia), ETo, ETCs_NDVI y ETCs_SAVI se indica en la Figura 9 donde los valores más altos de temperatura se dieron en el mes de noviembre con 17.66° C y en el mes de julio fue el de menor con 15.46° C

Se realizó la correlación de la temperatura media diaria (Tmedia) con los valores de la evapotranspiración de referencia (ETo), la evapotranspiración de cultivos con el NDVI (ETCs_NDVI) y la evapotranspiración de cultivos con el SAVI (ETCs_SAVI), indicando una correlación directa ($r = 0.79$; $r = 0.78$; $r = 0.75$, respectivamente).

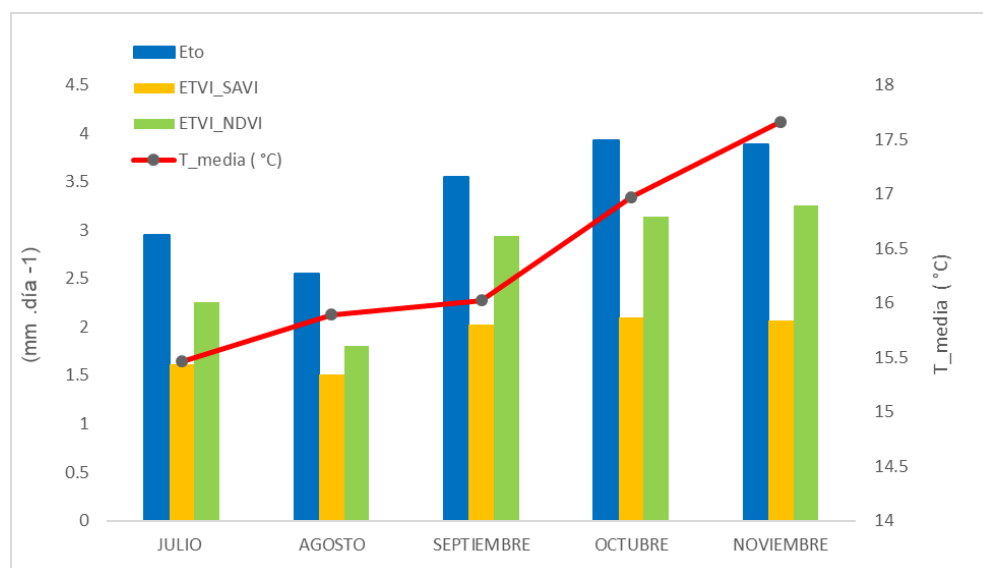


Figura 9. Relación entre la temperatura media diaria con la ETo, ETCs_NDVI y la ETCs_SAVI

4.7 Relación de la ETCs_NDVI, ETCs_SAVI y ETo con la Radiación solar diaria (Rso)

La relación entre la radiación solar diaria (Rso), ETo, ETCs_NDVI y ETCs_SAVI se indica en la Figura 10 donde los valores más altos Rso se dieron en el mes de septiembre con 21.6 MJm⁻²/día con y en el mes de julio fue el de menor con 16.55 MJm⁻²/día.

Se realizó la correlación de la radiación solar diaria (Rso) con los valores de la evapotranspiración de referencia (ETo), la evapotranspiración de cultivos con el NDVI (ETCs_NDVI) y la evapotranspiración de cultivos con el SAVI (ETCs_SAVI), indicando una correlación directa ($r = 0.72$; $r = 0.73$; $r = 0.82$, respectivamente).

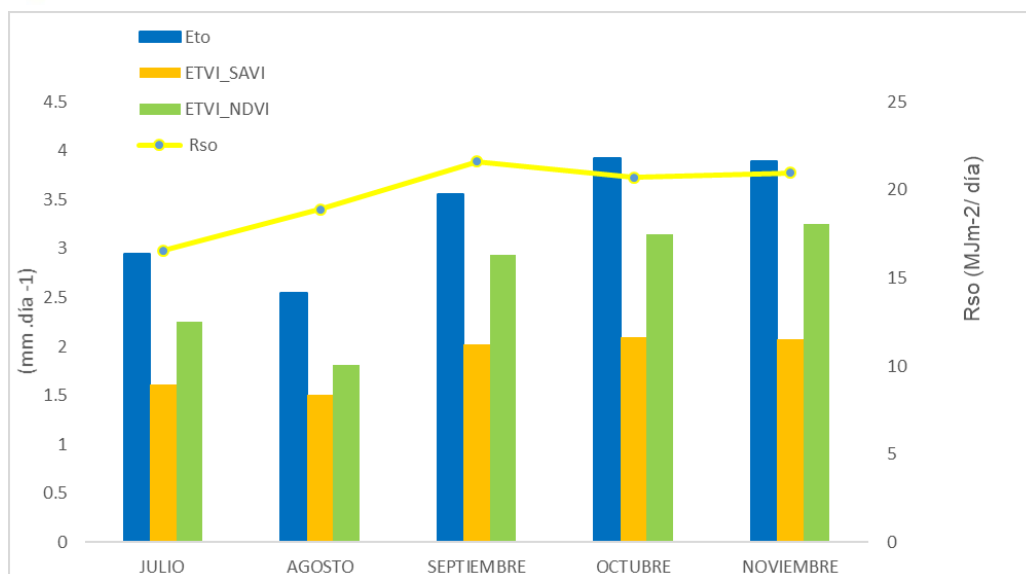


Figura 10. Relación entre la radiación solar diaria (Rso) con la ETo, ETCs_NDVI y la ETCs_SAVI

5 DISCUSIÓN E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

La evapotranspiración de referencia (ETo) obtenida por el método de la FAO-56 Penman Monteith dio un valor promedio diario de 3.37 mm día^{-1} , sin embargo cabe recalcar que este método se diseñó para un tipo de vegetación de pasto corto (con la radiación como la principal restricción de ETo) (P. Nagler, Glenn, Nguyen, Scott, & Doody, 2013). También es importante tener en cuenta que debido a la falta de disponibilidad de datos como es la humedad relativa mínima y máxima se tuvo que trabajar con la humedad relativa media (HR media) en cuatro estaciones meteorológicas y según la FAO usar la HR media da resultados menos precisos.

La disponibilidad de imágenes satelitales para el área de estudio que es la cuenca del río Paute es muy escasa debido la excesiva nubosidad, por lo que es un inconveniente poder rastrear la variabilidad de los índices de vegetación, que a su vez tienen un gran efecto en las estimaciones ETCs (Allen et al., 2007). Según (Reyes González et al., 2019) un mayor aumento en la biomasa y en la cobertura vegetal produce valores elevados del coeficiente de cultivo con el NDVI.

El cálculo del coeficiente de cultivo Kc mediante el NDVI es una medición cualitativa de la densidad de la vegetación, pero no es cuantitativa, también el NDVI es muy sensible a las propiedades ópticas del suelo. En el estudio realizado por (Singh Rawat et al., 2019) recomienda usar el índice de vegetación SAVI para determinar el coeficiente de cultivo debido a que este índice no se ve afectado por la humedad de la superficie del suelo, lo contrario ocurre con el NDVI que se vió afectado por la humedad del suelo. Es

por esto que en las Figuras 3 y 4 se observa las diferencias entre los coeficientes de cultivo obtenidos por el NDVI y el SAVI. Además (Gontia & Tiwari, 2010) en su investigación obtiene mejores resultados de coeficientes de cultivo para el trigo con el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) por ser un índice mejorado y tener un factor L que depende del tipo de vegetación.

Una restricción importante que se tiene es la ausencia de datos directos de medición de coeficientes de cultivo (K_c) como los lisímetros, torres de flujo entre otros para calcular la evapotranspiración, esto limita la determinación de un coeficiente de cultivo para estimar adecuadamente la ET y para la validación de datos (Ramón-Reinozo et al., 2019).

La evapotranspiración calculada con el NDVI (ETCs_NDVI) dio un valor promedio diario de 2.68 mm día^{-1} y con el SAVI (ETCs_SAVI) 1.86 mm día^{-1} , siendo este último valor el más cercano al obtenido por (Crespo et al., 2011) con un rango de evapotranspiración de $0.90 - 1.50 \text{ mm día}^{-1}$ en la misma cuenca del río Paute. En un área de páramo cercana al estudio (Ramón-Reinozo et al., 2019) con el uso de índices de vegetación obtiene un valor de evapotranspiración de cultivo de 1.07 mm día^{-1} . En la microcuenca de Chaquilcay un ecosistema natural que está ubicado dentro del bosque protector Aguarongo en Gualaceo, se obtuvo una evapotranspiración de referencia de 1.60 mm día^{-1} mediante el método de Thornthwaite (Duque-Sarango, Cajamarca-Rivadeneira, Wemple, & Delgado-Fernández, 2019). En el estudio realizado por (Carrillo-Rojas et al., 2016) en el páramo Andino del sur del Ecuador obtuvo una evapotranspiración de cultivo de $1.64 - 2.27 \text{ mm día}^{-1}$ a través de un método de balance de energía superficial (SEB).

Estudios previos realizados en una selva tropical (Glenn et al., 2010b) indicaron que la transpiración depende de las especies de vegetación y su respuesta a los factores climáticos. Sin embargo (Zhang, Zhou, Wang, Yang, & Nilsson, 2012) informa que la evapotranspiración en su investigación realizada en un ecosistema de Mongolia en China, se vio afectada por el contenido de agua del suelo, el déficit de la presión de vapor y la humedad relativa (HR). Sin embargo otras investigaciones realizadas indican que la evapotranspiración dependía de la precipitación debido a los cambios en la humedad del suelo (Glenn et al., 2011).

La ETo, ETCs_NDVI y la ETCs_SAVI se vio afectada tanto con la temperatura media como con la radiación solar, en meses donde hubo mayor radiación la

evapotranspiración fue alta, esto coincide con lo indicado por (Córdova et al., 2016) que indica que la radiación es el principal controlador en los sitios ecuatoriales donde la energía entrante limita la evapotranspiración. (Carrillo-Rojas et al., 2016) indica que la evapotranspiración es mayor en los meses con poca nubosidad independiente del tipo de vegetación, es por ello que en la Figura 10 se observa que los meses de septiembre y octubre la evapotranspiración aumentó cuando la precipitación se encontraba limitada. La vegetación generalmente cierra sus estomas durante los eventos de lluvia, debido a la acumulación de agua y la baja fotosíntesis producida por la nubosidad, es por ello que encontrar valores de evapotranspiración bajos en el período lluvioso es razonable según lo indica (Choudhury, Ahmed, Idso, Reginato, & Daughtry, 1994).

6 CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la evapotranspiración de cultivos en la cuenca del río Paute mediante imágenes satelitales. Lo cual con el índice de vegetación SAVI se logró obtener valores más cercanos de evapotranspiración comparando con lugares similares a la cuenca del Paute.

La evapotranspiración en la cuenca del río Paute obtuvo una correlación inversa con la precipitación, pero por lo contrario en cuanto a la temperatura media (T_{media}) y la radiación solar (R_{so}) se dieron correlaciones directas.

La comparación entre la evapotranspiración de referencia (ET_o), la evapotranspiración de cultivos con el NDVI ($ETCs_NDVI$) y la evapotranspiración de cultivos con SAVI ($ETCs_SAVI$), varían debido a que la primera se toma como referencia un cultivo de pasto, mientras que el NDVI determina el estado de la vegetación y el SAVI es un índice mejorado con un factor que depende del tipo de vegetación.

Las estimaciones de la evapotranspiración por teledetección en los últimos años ha incrementado y es muy probable que ha futuro se optimice debido a las mejoras en los datos satelitales y terrestres, para así proporcionar estimaciones de evapotranspiración más válidas y con un rango mayor de escalas temporales y de resolución espacial.

7 RECOMENDACIONES

Por la baja disponibilidad de datos meteorológicos y satelitales se tomó un tiempo de

estudio muy corto, por lo tanto, se debería tener en cuenta más meses de análisis para lograr una mejor comprensión de la evapotranspiración general en la cuenca del río Paute.

Para futuras investigaciones se puede obtener la evapotranspiración con otro método de determinación como es el de balance de energía superficial (SEB), o con métodos directos para así r calibrar y validar los modelos espaciales.

Se espera que a futuro la disponibilidad de datos tantos meteorológicos y satelitales aumenten, para facilitar análisis más profundos y contar con mejor calidad de información.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Barker, J. B., Heeren, D. M., Neale, C. M. U., & Rudnick, D. R. (2018). Evaluation of variable rate irrigation using a remote-sensing-based model. *Agricultural Water Management*, 203(March), 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.022>
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Córdova, M., Céleri, R., & Bendix, J. (2016). Dynamic Mapping of Evapotranspiration Using an Energy Balance-Based Model over an Andean Páramo Catchment of Southern Ecuador. *Remote Sensing*, 8(2), 160. <https://doi.org/10.3390/rs8020160>
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors.

- Remote Sensing of Environment*, 113, 893–903.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Choudhury, B. J., Ahmed, N. U., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Daughtry, C. S. T. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 50(1), 1–17.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90090-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90090-6)
- Contreras, J., Ballari, D., & Samaniego, E. (2017). Optimización de una red de monitoreo de precipitación usando modelos Geoestadísticos: caso de estudio en la cuenca del río Paute, Ecuador. Retrieved from
https://www.researchgate.net/publication/322988831_Optimizacion_de_una_red_de_monitoreo_de_precipitacion_usando_modelos_Geoestadisticos_caso_de_estudio_en_la_cuenca_del_rio_Paute_Ecuador
- Córdova, M., Céleri, R., Shellito, C. J., Orellana-Alvear, J., Abril, A., & Carrillo-Rojas, G. (2016). Near-surface air temperature lapse rate over complex terrain in the Southern Ecuadorian Andes: Implications for temperature mapping. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 48(4), 673–684.
<https://doi.org/10.1657/AAAR0015-077>
- Courault, D., Seguin, B., & Olioso, A. (2005, November). Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. *Irrigation and Drainage Systems*.
<https://doi.org/10.1007/s10795-005-5186-0>
- Crespo, P. J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücken, A., Breuer, L., Frede, H.-G., & Ramírez, M. (2011). Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 407(1–4), 164–174.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>
- Deleg, F. (2018). *PRONÓSTICO DE LLUVIA UTILIZANDO MÉTODOS ESTADÍSTICOS EN LA CUENCA DEL RÍO PAUTE*. Universidad de Cuenca . Retrieved from
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30398/1/Trabajo-de-titulación.pdf>
- Duque-Sarango, P., Cajamarca-Rivadeneira, R., Wemple, B. C., & Delgado-Fernández, M. E. (2019). Estimation of the water balance of for a small tropical andean catchment. *Granja*, 29(1), 56–69. <https://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.05>
- El-Shikha, D. M., Waller, P., Hunsaker, D., Clarke, T., & Barnes, E. (2007). Ground-based remote sensing for assessing water and nitrogen status of broccoli. *Agricultural Water Management*, 92(3), 183–193.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.05.020>

- Er-Raki, S., Chehbouni, A., & Duchemin, B. (2010). Combining Satellite Remote Sensing Data with the FAO-56 Dual Approach for Water Use Mapping In Irrigated Wheat Fields of a Semi-Arid Region. *Remote Sensing*, 2(1), 375–387. <https://doi.org/10.3390/rs2010375>
- Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., Hirschboeck, K. K., & Brown, P. (2007, May). Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration. *Critical Reviews in Plant Sciences*. <https://doi.org/10.1080/07352680701402503>
- Glenn, E. P., Nagler, P. L., & Huete, A. R. (2010a). Vegetation Index Methods for Estimating Evapotranspiration by Remote Sensing. *Surveys in Geophysics*, 31(6), 531–555. <https://doi.org/10.1007/s10712-010-9102-2>
- Glenn, E. P., Nagler, P. L., & Huete, A. R. (2010b). Vegetation Index Methods for Estimating Evapotranspiration by Remote Sensing. *Surveys in Geophysics*, 31(6), 531–555. <https://doi.org/10.1007/s10712-010-9102-2>
- Glenn, E. P., Neale, C. M. U., Hunsaker, D. J., & Nagler, P. L. (2011). Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrological Processes*, 25(26), 4050–4062. <https://doi.org/10.1002/hyp.8392>
- Gontia, N. K., & Tiwari, K. N. (2010). Estimation of crop coefficient and evapotranspiration of wheat (*Triticum aestivum*) in an irrigation command using remote sensing and GIS. *Water Resources Management*, 24(7), 1399–1414. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9505-3>
- Gonzalez-Dugo, M. P., Neale, C. M. U., Mateos, L., Kustas, W. P., Prueger, J. H., Anderson, M. C., & Li, F. (n.d.). A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.012>
- Hantson, S., Chuvieco Salinero, E., Pons, X., Domingo, C., Cea, C., Moré, G., ... Tejeiro, J. (2011). Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección: Revista de La Asociación Española de Teledetección*, (36), 51–61. Retrieved from <http://www.ign.es/PNT/pdf/especi->
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Hunsaker, D. J., Barnes, E. M., Clarke, T. R., Fitzgerald, G. J., & Pinter, P. J. (2005). Cotton irrigation scheduling using remotely sensed and FAO-56 basal crop coefficients. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 48(4), 1395–1407. <https://doi.org/10.13031/2013.19197>
- Jayanthi, H., Neale, C. M. U., & Wright, J. L. (2007). Development and validation of

- canopy reflectance-based crop coefficient for potato. *Agricultural Water Management*, 88(1–3), 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.020>
- Karimi, P., & Bastiaanssen, W. G. M. (2015). Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting-Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 19, 507–532. <https://doi.org/10.5194/hess-19-507-2015>
- Liaqat, U. W., & Choi, M. (2017). Accuracy comparison of remotely sensed evapotranspiration products and their associated water stress footprints under different land cover types in Korean peninsula. *Journal of Cleaner Production*, 155, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.022>
- Maeda, E. E., Wiberg, D. A., & Pellikka, P. K. E. (2011). Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *Applied Geography*, 31(1), 251–258. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.05.011>
- Molina, A., Vanacker, V., Brisson, E., Mora, D., & Balthazar, V. (2015). Long-term effects of climate and land cover change on freshwater provision in the tropical Andes. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12(6), 5219–5250. <https://doi.org/10.5194/hessd-12-5219-2015>
- Nagler, P., Glenn, E., Nguyen, U., Scott, R., & Doody, T. (2013). Estimating Riparian and Agricultural Actual Evapotranspiration by Reference Evapotranspiration and MODIS Enhanced Vegetation Index. *Remote Sensing*, 5(8), 3849–3871. <https://doi.org/10.3390/rs5083849>
- Nagler, P. L., Morino, K., Murray, R. S., Osterberg, J., & Glenn, E. P. (2009). An empirical algorithm for estimating agricultural and riparian evapotranspiration using MODIS enhanced vegetation index and ground measurements of ET. I. Description of method. *Remote Sensing*, 1(4), 1273–1297. <https://doi.org/10.3390/rs1041273>
- Papadavid, G. C., Agapiou, A., Michaelides, S., & Hadjimitsis, D. G. (2009). Brief communication; “The integration of remote sensing and meteorological data for monitoring irrigation demand in Cyprus.” *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(6), 2009–2014. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-2009-2009>
- Park, J., Baik, J., & Choi, M. (2017). Satellite-based crop coefficient and evapotranspiration using surface soil moisture and vegetation indices in Northeast Asia. *Catena*, 156(July 2016), 305–314. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.013>
- Ramón-Reinozo, M., Ballari, D., Cabrera, J. J., Crespo, P., & Carrillo-Rojas, G. (2019). Altitudinal and temporal evapotranspiration dynamics via remote sensing and

- vegetation index-based modelling over a scarce-monitored, high-altitudinal Andean páramo ecosystem of Southern Ecuador. *Environmental Earth Sciences*, 78(11). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8337-6>
- Reyes-González, A. (2017). USING REMOTE SENSING TO ESTIMATE CROP WATER USE TO IMPROVE IRRIGATION WATER MANAGEMENT BY ARTURO REYES-GONZÁLEZ A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the Doctor of Philosophy Major in Biological Science South Dakota State.
- Reyes-González, A., Kjaersgaard, J., Trooien, T., Hay, C., & Ahiablame, L. (2018). Estimation of Crop Evapotranspiration Using Satellite Remote Sensing-Based Vegetation Index. *Advances in Meteorology*, 2018(1). <https://doi.org/10.1155/2018/4525021>
- Reyes González, A., Reta Sánchez, D. G., Sánchez Duarte, J. I., Ochoa Martínez, E., Rodríguez Hernández, K., & Preciado Rangel, P. (2019). Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones in situ. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 37(3), 279. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.485>
- Singh, R. K. (2009). GEOSPATIAL APPROACH FOR ESTIMATING LAND SURFACE EVAPOTRANSPIRATION by Presented to the Faculty of The Graduate College at the University of Nebraska in Partial Fulfillment of Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy Major : Engineering (Agricu.
- Singh, R. K., Liu, S., Tieszen, L. L., Suyker, A. E., & Verma, S. B. (2012). Estimating seasonal evapotranspiration from temporal satellite images. *Irrigation Science*, 30(4), 303–313. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0287-z>
- Singh Rawat, K., Kumar Singh, S., Bala, A., & Szabó, S. (2019). Estimation of crop evapotranspiration through spatial distributed crop coefficient in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 213, 922–933. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.002>
- Taherparvar, M., & Pirmoradian, N. (2018). ScienceDirect Estimation of Rice Evapotranspiration Using Reflective Images of Landsat Satellite in Sefidrood Irrigation and Drainage Network. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2018.02.003>
- Wang, H., & Jia, G. (2013). Regional estimates of evapotranspiration over Northern China using a remote-sensing-based triangle interpolation method. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(5), 1479–1490. <https://doi.org/10.1007/s00376-013-2294-x>
- Zhang, F., Zhou, G., Wang, Y., Yang, F., & Nilsson, C. (2012). Evapotranspiration and crop coefficient for a temperate desert steppe ecosystem using eddy covariance in

- Inner Mongolia, China. *Hydrological Processes*, 26(3), 379–386.
<https://doi.org/10.1002/hyp.8136>
- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380–394.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Barker, J. B., Heeren, D. M., Neale, C. M. U., & Rudnick, D. R. (2018). Evaluation of variable rate irrigation using a remote-sensing-based model. *Agricultural Water Management*, 203(March), 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.02.022>
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Córdova, M., Céleri, R., & Bendix, J. (2016). Dynamic Mapping of Evapotranspiration Using an Energy Balance-Based Model over an Andean Páramo Catchment of Southern Ecuador. *Remote Sensing*, 8(2), 160.
<https://doi.org/10.3390/rs8020160>
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, 893–903.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Choudhury, B. J., Ahmed, N. U., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Daughtry, C. S. T. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 50(1), 1–17.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90090-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90090-6)
- Contreras, J., Ballari, D., & Samaniego, E. (2017). Optimización de una red de monitoreo de precipitación usando modelos Geoestadísticos: caso de estudio en la cuenca del río Paute, Ecuador. Retrieved from
https://www.researchgate.net/publication/322988831_Optimizacion_de_una_red_de_monitoreo_de_precipitacion_usando_modelos_Geoestadisticos_caso_de_estudio_en_la_cuenca_del_rio_Paute_Ecuador
- Córdova, M., Céleri, R., Shellito, C. J., Orellana-Alvear, J., Abril, A., & Carrillo-Rojas, G. (2016). Near-surface air temperature lapse rate over complex terrain in the Southern Ecuadorian Andes: Implications for temperature mapping. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 48(4), 673–684.
<https://doi.org/10.1657/AAAR0015-077>
- Courault, D., Seguin, B., & Olioso, A. (2005, November). Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. *Irrigation and Drainage Systems*.
<https://doi.org/10.1007/s10795-005-5186-0>
- Crespo, P. J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücken, A., Breuer, L., Frede, H.-G., & Ramírez,

- M. (2011). Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 407(1–4), 164–174.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>
- Deleg, F. (2018). *PRONÓSTICO DE LLUVIA UTILIZANDO MÉTODOS ESTADÍSTICOS EN LA CUENCA DEL RÍO PAUTE*. Universidad de Cuenca .
Retrieved from
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30398/1/Trabajo-de-titulación.pdf>
- Duque-Sarango, P., Cajamarca-Rivadeneira, R., Wemple, B. C., & Delgado-Fernández, M. E. (2019). Estimation of the water balance of for a small tropical andean catchment. *Granja*, 29(1), 56–69. <https://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.05>
- El-Shikha, D. M., Waller, P., Hunsaker, D., Clarke, T., & Barnes, E. (2007). Ground-based remote sensing for assessing water and nitrogen status of broccoli. *Agricultural Water Management*, 92(3), 183–193.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.05.020>
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., & Duchemin, B. (2010). Combining Satellite Remote Sensing Data with the FAO-56 Dual Approach for Water Use Mapping In Irrigated Wheat Fields of a Semi-Arid Region. *Remote Sensing*, 2(1), 375–387.
<https://doi.org/10.3390/rs2010375>
- Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., Hirschboeck, K. K., & Brown, P. (2007, May). Integrating remote sensing and ground methods to estimate evapotranspiration. *Critical Reviews in Plant Sciences*. <https://doi.org/10.1080/07352680701402503>
- Glenn, E. P., Nagler, P. L., & Huete, A. R. (2010a). Vegetation Index Methods for Estimating Evapotranspiration by Remote Sensing. *Surveys in Geophysics*, 31(6), 531–555. <https://doi.org/10.1007/s10712-010-9102-2>
- Glenn, E. P., Nagler, P. L., & Huete, A. R. (2010b). Vegetation Index Methods for Estimating Evapotranspiration by Remote Sensing. *Surveys in Geophysics*, 31(6), 531–555. <https://doi.org/10.1007/s10712-010-9102-2>
- Glenn, E. P., Neale, C. M. U., Hunsaker, D. J., & Nagler, P. L. (2011). Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrological Processes*, 25(26), 4050–4062.
<https://doi.org/10.1002/hyp.8392>
- Gontia, N. K., & Tiwari, K. N. (2010). Estimation of crop coefficient and evapotranspiration of wheat (*Triticum aestivum*) in an irrigation command using remote sensing and GIS. *Water Resources Management*, 24(7), 1399–1414.
<https://doi.org/10.1007/s11269-009-9505-3>
- Gonzalez-Dugo, M. P., Neale, C. M. U., Mateos, L., Kustas, W. P., Prueger, J. H.,

- Anderson, M. C., & Li, F. (n.d.). A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.012>
- Hantson, S., Chuvieco Salinero, E., Pons, X., Domingo, C., Cea, C., Moré, G., ... Tejeiro, J. (2011). Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección: Revista de La Asociación Española de Teledetección*, (36), 51–61. Retrieved from <http://www.ign.es/PNT/pdf/especi->
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Hunsaker, D. J., Barnes, E. M., Clarke, T. R., Fitzgerald, G. J., & Pinter, P. J. (2005). Cotton irrigation scheduling using remotely sensed and FAO-56 basal crop coefficients. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 48(4), 1395–1407. <https://doi.org/10.13031/2013.19197>
- Jayanthi, H., Neale, C. M. U., & Wright, J. L. (2007). Development and validation of canopy reflectance-based crop coefficient for potato. *Agricultural Water Management*, 88(1–3), 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.10.020>
- Karimi, P., & Bastiaanssen, W. G. M. (2015). Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting-Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 19, 507–532. <https://doi.org/10.5194/hess-19-507-2015>
- Liaqat, U. W., & Choi, M. (2017). Accuracy comparison of remotely sensed evapotranspiration products and their associated water stress footprints under different land cover types in Korean peninsula. *Journal of Cleaner Production*, 155, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.022>
- Maeda, E. E., Wiberg, D. A., & Pellikka, P. K. E. (2011). Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *Applied Geography*, 31(1), 251–258. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.05.011>
- Molina, A., Vanacker, V., Brisson, E., Mora, D., & Balthazar, V. (2015). Long-term effects of climate and land cover change on freshwater provision in the tropical Andes. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12(6), 5219–5250. <https://doi.org/10.5194/hessd-12-5219-2015>
- Nagler, P., Glenn, E., Nguyen, U., Scott, R., & Doody, T. (2013). Estimating Riparian and Agricultural Actual Evapotranspiration by Reference Evapotranspiration and MODIS Enhanced Vegetation Index. *Remote Sensing*, 5(8), 3849–3871. <https://doi.org/10.3390/rs5083849>

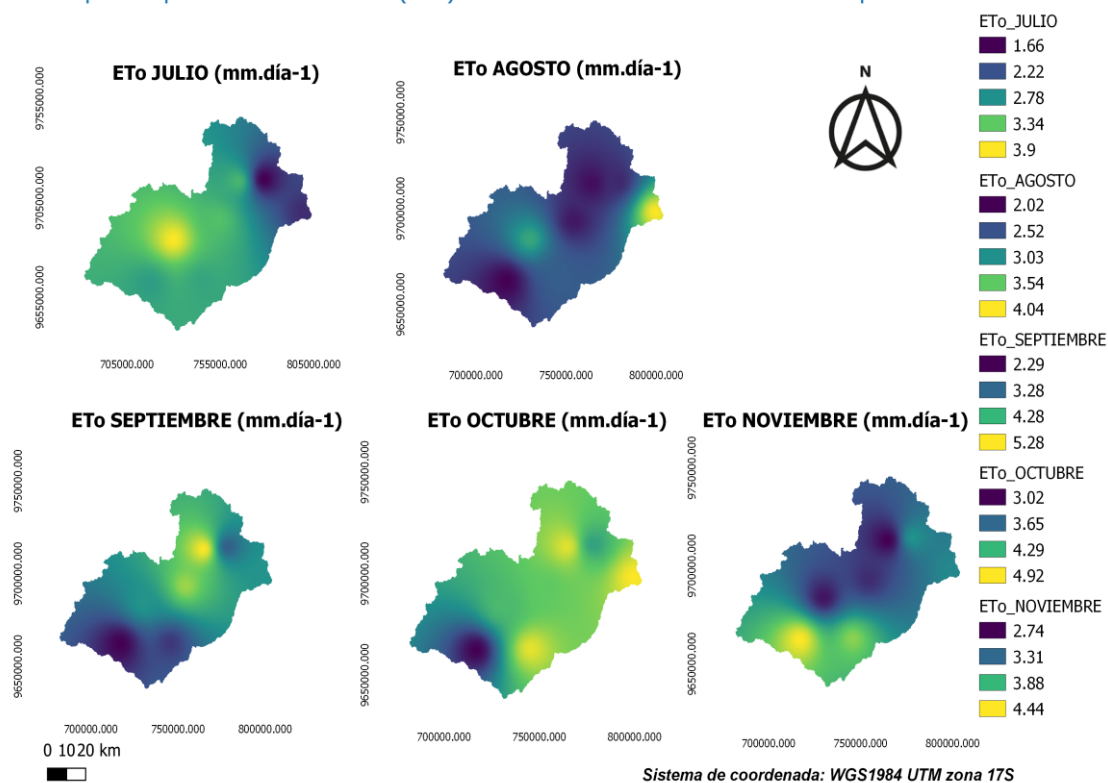
- Nagler, P. L., Morino, K., Murray, R. S., Osterberg, J., & Glenn, E. P. (2009). An empirical algorithm for estimating agricultural and riparian evapotranspiration using MODIS enhanced vegetation index and ground measurements of ET. I. Description of method. *Remote Sensing*, 1(4), 1273–1297.
<https://doi.org/10.3390/rs1041273>
- Papadavid, G. C., Agapiou, A., Michaelides, S., & Hadjimitsis, D. G. (2009). Brief communication; “The integration of remote sensing and meteorological data for monitoring irrigation demand in Cyprus.” *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(6), 2009–2014. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-2009-2009>
- Park, J., Baik, J., & Choi, M. (2017). Satellite-based crop coefficient and evapotranspiration using surface soil moisture and vegetation indices in Northeast Asia. *Catena*, 156(July 2016), 305–314.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.013>
- Ramón-Reinozo, M., Ballari, D., Cabrera, J. J., Crespo, P., & Carrillo-Rojas, G. (2019). Altitudinal and temporal evapotranspiration dynamics via remote sensing and vegetation index-based modelling over a scarce-monitored, high-altitudinal Andean páramo ecosystem of Southern Ecuador. *Environmental Earth Sciences*, 78(11). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8337-6>
- Reyes-González, A. (2017). USING REMOTE SENSING TO ESTIMATE CROP WATER USE TO IMPROVE IRRIGATION WATER MANAGEMENT BY ARTURO REYES-GONZÁLEZ A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the Doctor of Philosophy Major in Biological Science South Dakota State.
- Reyes-González, A., Kjaersgaard, J., Trooien, T., Hay, C., & Ahiablame, L. (2018). Estimation of Crop Evapotranspiration Using Satellite Remote Sensing-Based Vegetation Index. *Advances in Meteorology*, 2018(1).
<https://doi.org/10.1155/2018/4525021>
- Reyes González, A., Reta Sánchez, D. G., Sánchez Duarte, J. I., Ochoa Martínez, E., Rodríguez Hernández, K., & Preciado Rangel, P. (2019). Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones in situ. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 37(3), 279.
<https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.485>
- Singh, R. K. (2009). GEOSPATIAL APPROACH FOR ESTIMATING LAND SURFACE EVAPOTRANSPIRATION by Presented to the Faculty of The Graduate College at the University of Nebraska in Partial Fulfillment of Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy Major : Engineering (Agricu.
- Singh, R. K., Liu, S., Tieszen, L. L., Suyker, A. E., & Verma, S. B. (2012). Estimating

- seasonal evapotranspiration from temporal satellite images. *Irrigation Science*, 30(4), 303–313. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0287-z>
- Singh Rawat, K., Kumar Singh, S., Bala, A., & Szabó, S. (2019). Estimation of crop evapotranspiration through spatial distributed crop coefficient in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 213, 922–933. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.002>
- Taherparvar, M., & Pirmoradian, N. (2018). ScienceDirect Estimation of Rice Evapotranspiration Using Reflective Images of Landsat Satellite in Sefidrood Irrigation and Drainage Network. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2018.02.003>
- Wang, H., & Jia, G. (2013). Regional estimates of evapotranspiration over Northern China using a remote-sensing-based triangle interpolation method. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(5), 1479–1490. <https://doi.org/10.1007/s00376-013-2294-x>
- Zhang, F., Zhou, G., Wang, Y., Yang, F., & Nilsson, C. (2012). Evapotranspiration and crop coefficient for a temperate desert steppe ecosystem using eddy covariance in Inner Mongolia, China. *Hydrological Processes*, 26(3), 379–386. <https://doi.org/10.1002/hyp.8136>

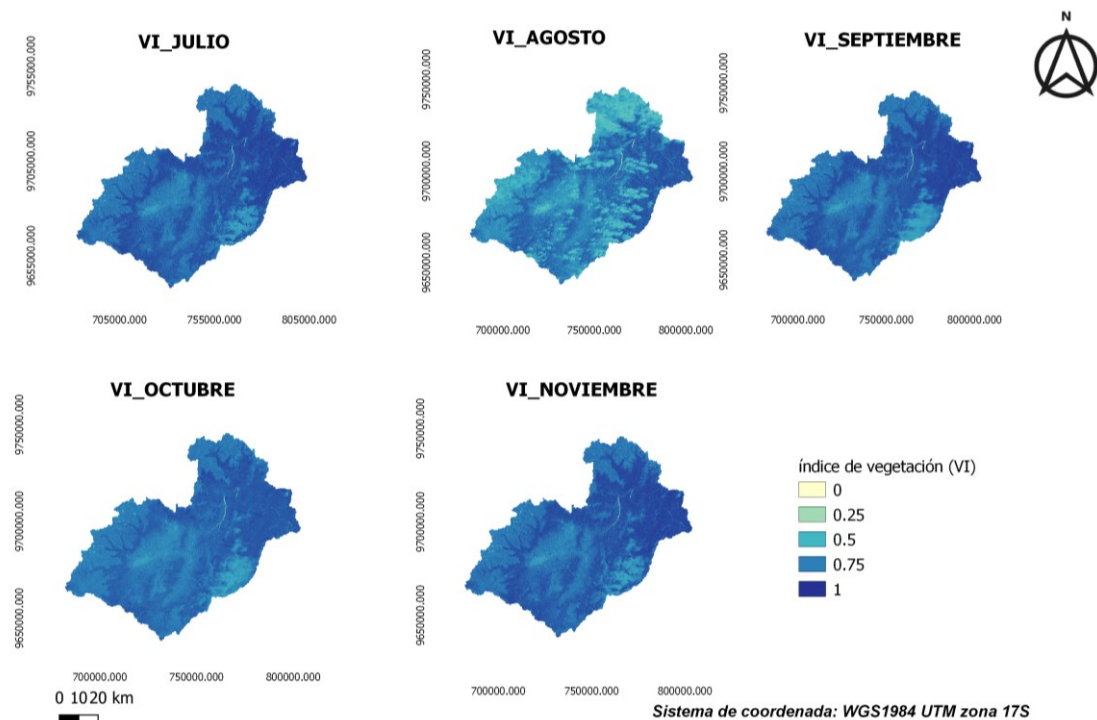
9 ANEXOS

Anexo 1. Evapotranspiración de referencia (ET_o) del período de estudio

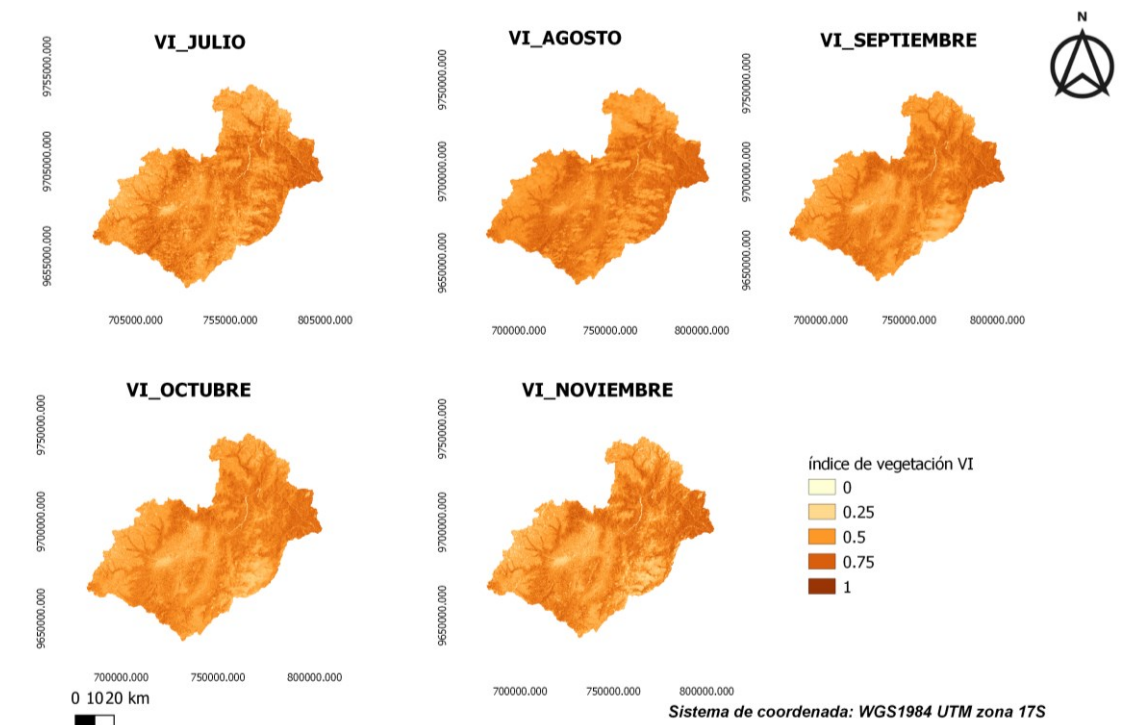
Evapotranspiración de referencia (ET_o) de la Cuenca del río Paute durante el período de estudio



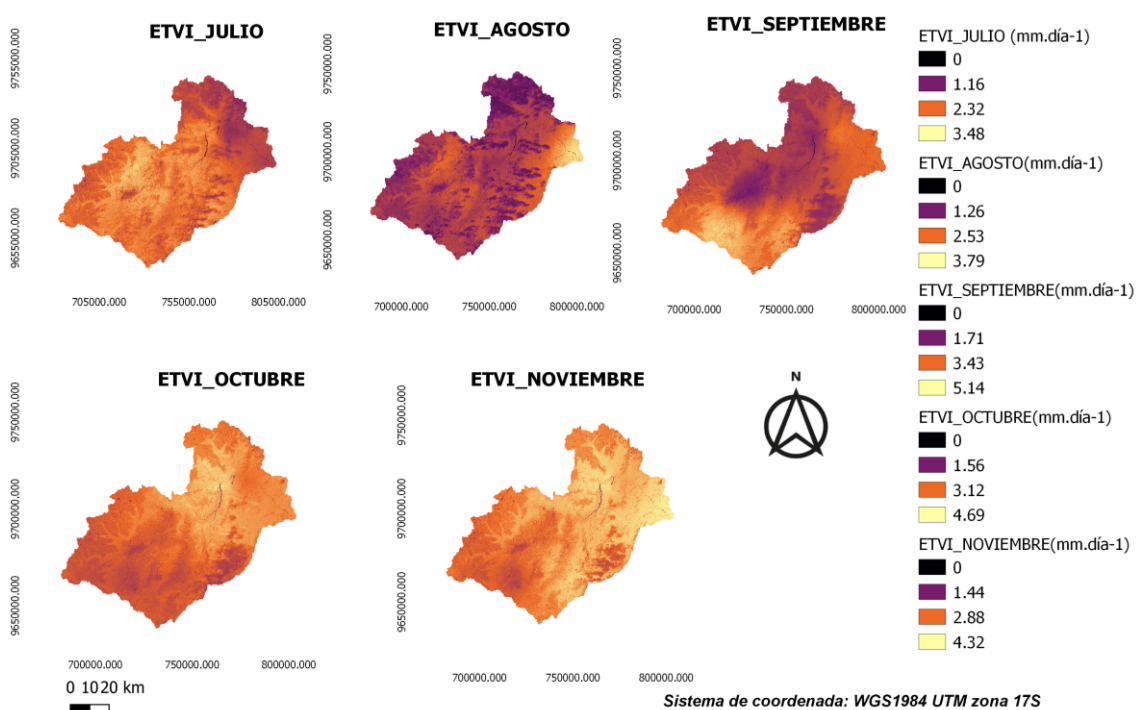
Anexo 2. Coeficiente de cultivo K_c con NDVI



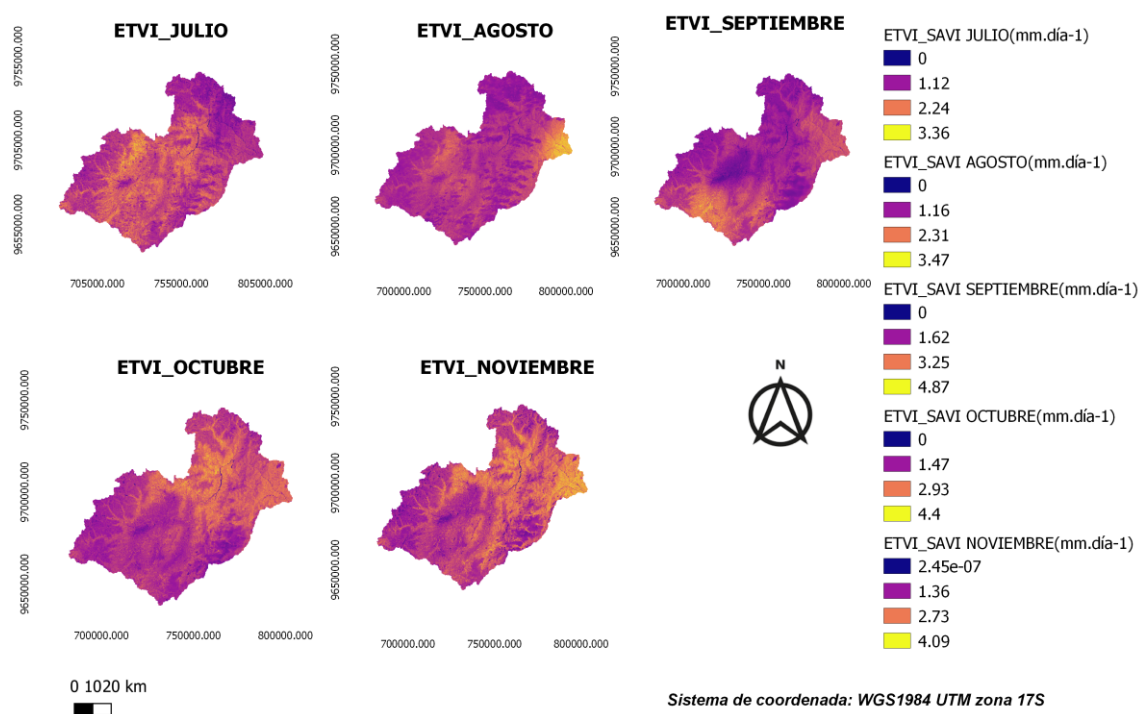
Anexo 3. Coeficiente de cultivo Kc con SAVI



Anexo 4. Evapotranspiración de cultivos con el NDVI (ETCs_NDVI)



Anexo 5. Evapotranspiración de cultivos con el SAVI (ETCs_SAVI)



Anexo 6. Diagrama de flujo para la obtención de la evapotranspiración de cultivos mediante índices de vegetación

